



日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日            2 0 0 3 年   5 月 2 0 日  
Date of Application:

出 願 番 号            特 願 2 0 0 3 - 1 4 1 6 5 9  
Application Number:  
[ST. 10/C]:            [ J P 2 0 0 3 - 1 4 1 6 5 9 ]

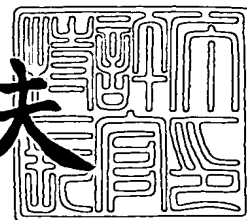
出   願   人            ソニー株式会社  
Applicant(s):



2 0 0 3 年 1 2 月   2 日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今 井 康 夫



【書類名】 特許願

【整理番号】 0390371202

【提出日】 平成15年 5月20日

【あて先】 特許庁長官 太田 信一郎 殿

【国際特許分類】 H01L 21/00

【発明者】

【住所又は居所】 東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 3 5 号 ソニー株式会社  
内

【氏名】 宇賀神 隆一

【特許出願人】

【識別番号】 000002185

【氏名又は名称】 ソニー株式会社

【代理人】

【識別番号】 100082762

【弁理士】

【氏名又は名称】 杉浦 正知

【電話番号】 03-3980-0339

【選任した代理人】

【識別番号】 100120640

【弁理士】

【氏名又は名称】 森 幸一

【先の出願に基づく優先権主張】

【出願番号】 特願2003- 48863

【出願日】 平成15年 2月26日

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 043812

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1



【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 0201252

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 量子カオス装置および量子カオスの制御方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第 1 の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第 2 の領域とが互いに隣接して設けられ、上記第 1 の領域と上記第 2 の領域との間で電子の授受が可能であるヘテロ接合を有し、

上記ヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、上記第 1 の領域および上記第 2 の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御する

ことを特徴とする量子カオス装置。

【請求項 2】 上記ヘテロ接合に上記電界を印加するための電極を有することを特徴とする請求項 1 記載の量子カオス装置。

【請求項 3】 上記第 1 の領域が金属状態にあり、上記第 2 の領域がランダムな媒体を有することを特徴とする請求項 1 記載の量子カオス装置。

【請求項 4】 上記第 1 の領域が金属状態にあり、上記第 2 の領域にランダムな磁場が存在することを特徴とする請求項 1 記載の量子カオス装置。

【請求項 5】 上記第 2 の領域に磁性不純物が添加されていることを特徴とする請求項 4 記載の量子カオス装置。

【請求項 6】 上記ヘテロ接合の接合界面に沿う方向の最大寸法が電子のコヒーレンス長以下であることを特徴とする請求項 1 記載の量子カオス装置。

【請求項 7】 上記第 1 の領域および上記第 2 の領域が層状の形状を有することを特徴とする請求項 1 記載の量子カオス装置。

【請求項 8】 上記層状の形状を有する上記第 1 の領域および上記第 2 の領域の少なくとも一方に絶縁膜を介して上記ヘテロ接合に上記電界を印加するための電極が設けられていることを特徴とする請求項 7 記載の量子カオス装置。

【請求項 9】 上記電界の印加に加えて、上記電子系のフェルミ準位を所定の値に設定することにより、上記第 1 の領域および上記第 2 の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御することを特徴とする請求項 1 記載の量子カ

オス装置。

【請求項 10】 上記電子系の密度を制御することによって上記フェルミ準位を所定の値に設定することを特徴とする請求項 9 記載の量子カオス装置。

【請求項 11】 上記フェルミ準位の制御によって、量子カオスから可積分的系への転移が起こる臨界的電界強度が制御されていることを特徴とする請求項 9 記載の量子カオス装置。

【請求項 12】 上記第 1 の領域と上記第 2 の領域との間のトランスファーが上記第 1 の領域内のトランスファーおよび上記第 2 の領域内のトランスファー以下であることを特徴とする請求項 1 記載の量子カオス装置。

【請求項 13】 上記第 1 の領域と上記第 2 の領域との間にトンネルバリア領域が設けられていることを特徴とする請求項 12 記載の量子カオス装置。

【請求項 14】 上記第 1 の領域および上記第 2 の領域はそれぞれ GaAs からなり、上記トンネルバリア領域は AlGaAs からなることを特徴とする請求項 13 記載の量子カオス装置。

【請求項 15】 量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第 1 の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第 2 の領域とが互いに隣接して設けられ、上記第 1 の領域と上記第 2 の領域との間で電子の授受が可能であるヘテロ接合を用い、

上記ヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、上記第 1 の領域および上記第 2 の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御するようにした

ことを特徴とする量子カオスの制御方法。

【請求項 16】 上記電界の印加に加えて、上記電子系のフェルミ準位を所定の値に設定することにより、上記第 1 の領域および上記第 2 の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御することを特徴とする請求項 15 記載の量子カオスの制御方法。

【請求項 17】 上記第 1 の領域と上記第 2 の領域との間のトランスファーが上記第 1 の領域内のトランスファーおよび上記第 2 の領域内のトランスファー以下であることを特徴とする請求項 15 記載の量子カオスの制御方法。

**【発明の詳細な説明】****【0001】****【発明の属する技術分野】**

この発明は、量子カオス装置および量子カオスの制御方法に関し、特に、新規な原理に基づいたものである。

**【0002】****【従来の技術】**

情報処理を担う物理系として、内在する非線形性は重要である。従来から用いられてきた素子として、ある程度の非線形な応答が見られる材料を用いた電子素子がある。例えば、電流－電圧特性に非線形性があるものとして、微分負抵抗を示す二端子素子が挙げられる。もちろん、三端子素子として、MOS－FETは現代の技術を支えている。そして、これらの非線形性を持つ電子素子を線形な電子回路で結合し、非線形性を持つ情報処理装置を構築することにより、任意の計算を実行することができる。

**【0003】**

しかしながら、そのような電子回路では、高度に集積化することによる困難が問題になってきている。例えば、発熱の問題である。内在する電気抵抗に起因するこの発熱は、電子素子の非線形性を生み出すために必須であり、情報処理を実行するのに不可欠であって、本質的である。

**【0004】**

この困難を回避するため、要素素子の非線形性を高めることで素子数を減らす試みがなされてきた。この方向を発展させると必然的に、要素素子がカオスを示す程に強い非線形性を持つものが望まれてくる。カオスを示す古典的な系を量子化したとき、その量子系の振る舞いを特徴付けるのが量子カオスである。

**【0005】**

一方で、要素素子が微細化されて行くと、その素子に閉じ込められた電子は量子力学的粒子として振る舞うことになる。従って、この観点より、量子カオスを示す要素素子に期待が集まっている。

本発明者は、材料の持つ構造の変化によって、その構造中の電子系における量

子カオスの制御が可能であることを理論的に示してきた。例えば、量子ドットの大きさを変化させることにより電子間相互作用の実効的大きさを調整することによる制御（非特許文献 1）、フラクタル・アグリゲイト（fractal aggregate）におけるフラクタル次元を制御することによる制御（非特許文献 2、3、4）、多重化階層構造における構造制御（非特許文献 5）、などが可能なものとして挙げられる。

**【0006】****【非特許文献 1】**

R. Ugajin, Physica A 237, 220 (1997)

**【非特許文献 2】**

R. Ugajin, S. Hirata, and Y. Kuroki, Physica A 278, 312 (2000)

**【非特許文献 3】**

R. Ugajin, Phys. Lett. A 277, 267 (2000)

**【非特許文献 4】**

R. Ugajin, Physica A 301, 1 (2001)

**【非特許文献 5】**

R. Ugajin, J. Nanotechnol. 1, 227 (2001)

**【0007】**

さらに、本発明者は、ある種の量子ドットを集合させたアレーにおいて、モット金属－絶縁体転移を、電界効果によって制御し得ることを理論的に示してきた（非特許文献 6、7、8、9）。一方で、不純物散乱が激しい層と高純度で不純物散乱が非常に少ない層との結合系に電界を印加することによって、その系の伝導性を制御することができることが示されている（非特許文献 10、11）。

**【非特許文献 6】**

R. Ugajin, J. Appl. Phys. 76, 2833 (1994)

**【非特許文献 7】**

R. Ugajin, Physica E 1, 226 (1997)

**【非特許文献 8】**

R. Ugajin, Phys. Rev. B 53, 10141 (1996)

## 【非特許文献 9】

R. Ugajin, J. Phys. Soc. Jpn. 65, 3952 (1996)

## 【非特許文献 1 0】

H. Sakaki, Jpn. J. Appl. Phys. 21, L381 (1982)

## 【非特許文献 1 1】

K. Hirakawa, H. Sakaki, and J. Yoshino, Phys. Rev. Lett. 54, 1279 (1985)

## 【0 0 0 8】

なお、量子準位統計量を用いて量子カオスが発生しているかどうかを検知できることが報告されている（非特許文献 1 2、1 3）。

## 【非特許文献 1 2】

L. E. Reichl, The transition to chaos: in conservative classical systems: quantum manifestations (Springer, New York, 1992)

## 【非特許文献 1 3】

F. Haake, Quantum Signatures of chaos, (Springer-Verlag, 1991))

また、量子カオス性の変調を定量的に調べるためのパラメータとして、Berry-Robnik パラメータ  $\rho$  が知られており（非特許文献 1 4）、準古典近似の範囲で  $\rho$  は位相空間における正則領域の体積比であることが知られている（非特許文献 1 5）。

## 【非特許文献 1 4】

M. V. Berry and M. Robnik, J. Phys. A (Math. Gen.) 17, 2413 (1984)

## 【非特許文献 1 5】

B. Eckhardt, Phys. Rep. 163, 205 (1988)

## 【0 0 0 9】

## 【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、上述の従来の量子カオス発生方法では、量子カオス性を制御することができる範囲は狭い範囲に限定されていたため、より広範囲に量子カオス性を制御することができる技術が求められていた。また、量子カオス性の制御を簡便に行うためには、外部から量子カオス性を制御することができることが望ま

しい。

#### 【0010】

従って、この発明が解決しようとする課題は、量子カオス性を広範囲に、しかも外部から制御することができる量子カオス装置および量子カオスの制御方法を提供することである。

この発明が解決しようとする他の課題は、単一の材料を用いても、量子カオス性を広範囲に、しかも外部から制御することができる量子カオス装置および量子カオスの制御方法を提供することにある。

#### 【0011】

##### 【課題を解決するための手段】

本発明者は、従来技術が有する上記の課題を解決するために鋭意検討を行った結果、量子カオスを示す金属状態の領域と、可積分性を有するアンダーソン局在状態を持つ領域とが結合した結合構造において、電界効果によって、この構造に閉じ込められた電子系の量子カオス性を従来より広範囲に、しかも外部から制御することができ、しかも単一の材料を用いてもこのような広範囲の制御が可能であることを見出した。

#### 【0012】

一方、マンガン (Mn) などの磁性不純物の添加により実現可能なランダム磁場によって、より強い非線形性を持つ GUE (Gaussian unitary ensemble) 量子カオスが発生することが知られているが、本発明者は、強い非線形性を持つ GUE 量子カオスを示す金属状態の領域と、可積分性を有するアンダーソン局在状態を持つ領域とが結合した結合構造において、電界効果によって、この構造に閉じ込められた電子系の量子カオス性を広範囲に、しかも外部から制御することができ、しかも単一の材料を用いてもこのような広範囲の制御が可能であることを見出した。

#### 【0013】

この発明は、上記の知見に基づいてさらに考察を行った結果、案出されたものである。

すなわち、上記課題を解決するために、この発明の第1の発明は、

量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第1の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第2の領域とが互いに隣接して設けられ、第1の領域と第2の領域との間で電子の授受が可能であるヘテロ接合を有し、

そのヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、第1の領域および第2の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御する

ことを特徴とする量子カオス装置である。

#### 【0014】

この発明の第2の発明は、

量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第1の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第2の領域とが互いに隣接して設けられ、第1の領域と第2の領域との間で電子の授受が可能であるヘテロ接合を用い、

そのヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、第1の領域および第2の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御するようにした

ことを特徴とする量子カオスの制御方法である。

#### 【0015】

この発明において、「ヘテロ接合」とは、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第1の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第2の領域とが互いに隣接（あるいは接触）することにより形成される接合であるが、これは電子系の性質が互いに異なる二つの領域が互いに隣接することにより形成される接合を意味し、同種の材料を用いるものであっても、異種材料を用いるものであってもよい。これらの材料としては、基本的にはどのような種類のものを用いてもよいが、具体的には、例えば半導体（SiやGeなどの元素半導体、GaAs、GaP、GaNなどのIII-V族化合物半導体、ZnSeなどのII-VI族化合物半導体など）である。第1の領域および第2の領域は、典型的には結晶からなり、一般的には層状の形状を有する。より具体的には、ヘテロ接合は、例えば、各種の結晶成長法を用いて第1の領域となる結晶層および第2の領域となる結晶層を成長させることにより形成される。第1の領域および第

2 の領域の境界部には遷移領域が存在する場合もあるが、この場合でも必要な物性を発現させる上で基本的な相違はない。

#### 【 0 0 1 6 】

典型的には、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第 1 の領域は金属状態にあり、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第 2 の領域はランダム（乱雑）な媒体を有し、あるいはランダム磁場が存在する。ランダムな媒体は、ランダムなポテンシャルが電子に働くものであれば、基本的にはどのようなものであってもよいが、典型的には不純物や格子欠陥などである。また、ランダム磁場は、典型的には Mn などの磁性不純物の添加により発生する。

このヘテロ接合においては、量子カオス発現の観点より、好適には、接合界面に沿う方向の最大寸法を電子のコヒーレンス長以下とする。

#### 【 0 0 1 7 】

ヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加するためには、一般的にはこのヘテロ接合に電界印加用の電極が設けられる。例えば、ヘテロ接合を構成する第 1 の領域および第 2 の領域の少なくとも一方に電極が設けられる。この場合、電極の電氣的絶縁のために、これらの電極は絶縁膜を介して設ける。特に、上記のように第 1 の領域および第 2 の領域が層状の形状を有する場合には、これらの第 1 の領域および第 2 の領域の少なくとも一方に絶縁膜を介して電極が設けられる。

量子カオス装置においては、必要に応じて、上記のヘテロ接合および電極に加えて、電気信号の入出力のための配線が設けられる。

上記の電界の印加、言い換えると電界効果による量子カオス性の制御は、同時にアンダーソン転移、すなわち金属／絶縁体転移を伴うが、第 1 の領域と第 2 の領域との間のトランスファーを第 1 の領域内のトランスファーおよび第 2 の領域内のトランスファー以下とすることにより、好適には第 1 の領域と第 2 の領域との間のトランスファーを第 1 の領域内のトランスファーおよび第 2 の領域内のトランスファーより充分に小さく（例えば、2 / 3 以下程度）することにより、電界効果によりアンダーソン転移を急峻に起こさせることができる。トランスファーを上記のように設定するためには、例えば、第 1 の領域と第 2 の領域との間に

トンネルバリア領域が設けられる。このような構造の典型的な例を挙げると、第1の領域および第2の領域がそれぞれGaAsからなり、トンネルバリア領域がAlGaAsからなる場合である。また、より高い温度において好適にこの発明の効果を発現させるための構造としては、例えば、第1の領域および第2の領域がそれぞれInGaAsからなり、トンネルバリア領域がAlGaAsからなるより大きなバンドオフセットを有する材料を用いたものが有効である。

この発明においては、電子系のフェルミ準位の制御によって、量子カオスから可積分的系への転移が起こる臨界的電界強度を制御することができる。従って、上記の電界の印加に加えて、電子系のフェルミ準位を所定の値に設定することによって、この電子系の量子カオス性をより広範囲に制御することができる。電子系のフェルミ準位の制御は電子系の密度の制御によって行うことができる。

#### 【0018】

上述のように構成されたこの発明によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第1の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第2の領域とからなるヘテロ接合に電界を印加することによって、これらの第1の領域および第2の領域からなる系の電子系を、典型的な量子カオスを示す状態からアンダーソン局在を示す状態まで自在に制御することができる。また、これはヘテロ接合の形成に用いる材料の種類によらない。さらに、電界の印加に加えてフェルミ準位の制御を併用することにより、量子カオス性をより広範囲に制御することができる。また、第1の領域と第2の領域との間のトランスファーを第1の領域内のトランスファーおよび第2の領域内のトランスファー以下とすることにより、アンダーソン転移を急峻に起こさせることができる。

#### 【0019】

##### 【発明の実施の形態】

以下、この発明の実施形態について説明する。

##### 第1の実施形態

この第1の実施形態においては、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域との結合系であるヘテロ接合を用いた量子カオス装置について説明する。

## 【0020】

この第1の実施形態を説明する前に、二次元の正方格子上の電子、より詳細には二次元ランダムポテンシャル中の電子状態について説明する。

いま、図1に示すように、一辺がLサイトからなる正方格子を考える。図1において、各格子点を黒丸で示す。この正方格子のp番目の格子点に量子を生成する演算子

【数1】

$$\hat{c}_p^\dagger$$

を定義する。ここで、この量子系のハミルトニアン

【数2】

$$\hat{H}_2$$

は以下のように定義される。

【数3】

$$\hat{H}_2 = -t \sum_{\langle p, q \rangle} \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_q + \sum_p v_p \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p + \text{H.C.} \quad (1)$$

ただしここで、 $\langle p, q \rangle$  は最近接サイトを意味する。また、 $t$  はトランスファーである。ランダムポテンシャルは  $v_p$  によって導入される。ここで、 $v_p$  は

【数4】

$$-V/2 < v_p < V/2 \quad (2)$$

により生成されるランダム変数である。ランダムポテンシャルは、具体的には、例えば、不純物の添加や格子欠陥の導入などにより導入することができる。

## 【0021】

$V/t$  が充分大きければアンダーソン局在を起こし、絶縁状態となっているであろう。 $V/t$  が充分小さければ、金属状態のフェルミ液体となる。無限の二次元元素では、ランダムポテンシャルの強度がどれほど小さくても、ゼロでなければ、すべての一電子状態は局在することが知られている。しかしながら、有限の局在長を有するのであるから、ここで考えている系のサイズ（格子点間距離を  $a$  と

すると L a) より局在長が長ければ、この有限領域内では金属的な状態として振る舞う。

【 0 0 2 2 】

ハミルトニアン

【数 5】

$$\hat{H}_2$$

の固有エネルギーを

【数 6】

$$\epsilon_m$$

、固有ベクトルを  $|m\rangle$  と書くと、

【数 7】

$$\hat{H}_2|m\rangle = \epsilon_m|m\rangle \quad (3)$$

である。ただし、 $m = 0, 1, 2, \dots, n$  である。

【 0 0 2 3 】

まず、 $n + 1$  個の量子準位

【数 8】

$$\epsilon_m$$

を、その最近接準位間間隔が平均で 1 になるように規格化する。つまり、

【数 9】

$$\omega_j = \epsilon_j - \epsilon_{j-1} \quad (4)$$

とする。ただし、 $j = 1, 2, \dots, n$  としたとき、

【数 1 0】

$$\bar{\omega} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \omega_j \quad (5)$$

を用い、新しい準位

## 【数 1 1】

$$\varepsilon_0 = 0 \quad (6)$$

$$\varepsilon_m = \frac{1}{\bar{\omega}} \sum_{j=1}^m \omega_j = \sum_{j=1}^m \Omega_j \quad (7)$$

へ変換する。ここで、

## 【数 1 2】

$$\Omega_j = \frac{\omega_j}{\bar{\omega}} \quad (8)$$

である。系の状態密度 (the density of states) は

## 【数 1 3】

$$\rho(\epsilon) = \frac{1}{n+1} \sum_{m=0}^n \delta(\epsilon - \varepsilon_m) \quad (9)$$

で定義され、その積分 (the staircase function)

## 【数 1 4】

$$\lambda(\epsilon) = \int_{-\infty}^{\epsilon} d\eta \rho(\eta) \quad (10)$$

を計算する。得られたstaircase functionは、アンフォールディング (unfolding) という操作を用いることにより、平均して状態密度が一定になるように変換される。このようにして得られた量子準位を用い、量子準位統計量として最近接準位間隔分布  $P(s)$  とダイソンとメータの  $\Delta_3$  統計量を計算する。上記非特許文献 1 2, 1 3 に記載されているように、これらの統計量を用いることで、量子カオスが発生しているかどうかを検知することができる。量子カオス系は、古典的カオス系と同様に外部からの摂動に対して敏感であることも知られており、非線形材料設計の指針として量子カオス解析は重要である。

## 【0 0 2 4】

可積分系の場合、最近接準位間隔分布  $P(s)$  と  $\Delta_3$  統計量はPoisson 分布のもの

## 【数 1 5】

$$P_P(s) = e^{-s} \quad (11)$$

$$\Delta_3(n) = \frac{n}{15} \quad (12)$$

で良く記述され、量子カオス系の場合、GOE (Gaussian orthogonal ensemble) 分布のもの

【数 16】

$$P_{\text{GOE}}(s) = \frac{\pi s}{2} e^{-\pi s^2/4} \quad (13)$$

$$\Delta_3(n) = \frac{1}{\pi^2} \left[ \log(2\pi n) + \gamma - \frac{\pi^2}{8} - \frac{5}{4} \right] + O(n^{-1}) \quad (14)$$

で良く記述される。ここで、 $\gamma$  はオイラー定数である。

【0025】

以下に示す数値計算では  $L = 40$  とし、周期的境界条件を用いることにする。全状態数は  $L^2 = 1600$  である。量子準位は  $n = 201$  から  $n = 800$  のものを利用した。  $t = 1$  を固定し、  $V$  を調整して量子カオス性を制御する。

【0026】

図2に最近接準位間間隔分布  $P(s)$  を、図3に  $\Delta_3$  統計量を示した。  $V$  として  $V = 2, 6, 10, 14, 18, 22$  を用いた。  $V = 2$  の場合、系の量子準位統計はGOEのもので良く記述され、金属的な量子カオス状態であることが分かる。一方で、  $V = 22$  の場合、系の量子準位統計はPoisson 分布のもので良く記述され、アンダーソン局在状態（可積分系）であることが分かる。  $V = 2$  から  $V = 22$  の変化に伴って、量子カオス系から可積分系への変化が見られている。

【0027】

さて、この第1の実施形態による量子カオス装置について説明する。

図4に示すように、一辺が  $L$  サイトからなる正方格子を二層考える。これらの二層によりヘテロ接合が形成されている。これらの層の最大寸法（格子点間距離を  $a$  とすると  $\sqrt{2}La$ ）は、電子のコヒーレンス長以下である。第1層の  $p$  番目の格子点に量子を生成する演算子

【数 17】

$$\hat{c}_p^\dagger$$

を定義する。また、第2層の  $p$  番目の格子点に量子を生成する演算子

【数 18】

$$\hat{d}_p^\dagger$$

を定義する。ここで、この量子系のハミルトニアン

【数 19】

$$\hat{H}$$

は以下のように定義される。

【数 20】

$$\begin{aligned} \hat{H} = & -t_1 \sum_{\langle p, q \rangle} \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_q - t_2 \sum_{\langle p, q \rangle} \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_q - t_3 \sum_p \hat{c}_p^\dagger \hat{d}_p \\ & + \sum_p v_p \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p + \sum_p w_p \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_p + \frac{\phi}{2} \sum_p (\hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p - \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_p) + \text{H.C.} \end{aligned} \quad (15)$$

ただしここで、 $\langle p, q \rangle$  は最近接サイトを意味する。また、 $t_1$  は第1層のトランスファー、 $t_2$  は第2層のトランスファー、 $t_3$  は第1層と第2層との間のトランスファーである。第1層のランダムポテンシャルは  $v_p$  によって導入される。ここで、 $v_p$  は

【数 21】

$$-V_1/2 < v_p < V_1/2 \quad (16)$$

により生成されるランダム変数である。また、第2層のランダムポテンシャルは  $w_p$  によって導入される。ここで、 $w_p$  は

【数 22】

$$-V_2/2 < w_p < V_2/2 \quad (17)$$

により生成されるランダム変数である。これらのランダムポテンシャルは、具体的には、例えば、不純物の添加や格子欠陥の導入などにより導入することができる。

【0028】

この場合、 $V_1 / t_1$  と  $V_2 / t_2$  との大小関係に応じて、第1層および第2層の一方が量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域あるいは可積

分性によって特徴付けられる電子系を有する領域となり、他方が可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域あるいは量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域となる。例えば、 $V_1 / t_1 < V_2 / t_2$  の場合には、第 1 の層が量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域、第 2 の層が可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域となる。

### 【0 0 2 9】

この場合、第 1 層の下側および第 2 層の上側に、少なくともこれらの層の全面を覆う大きさの電極（図示せず）がそれぞれ設けられている。そして、これらの電極間に電圧を印加することにより、それらを貫通するように  $z$  軸方向の電界を均一に印加することができるようになっている。

### 【0 0 3 0】

まず、最も単純な場合である、 $t_3 = 0$  の、第 1 層と第 2 層とが分離されている場合を考える。 $V_1 / t_1$  が十分に小さければ、第 1 層は金属状態のフェルミ液体となる。 $V_2 / t_2$  が十分に大きければ、第 2 層はアンダーソン局在を起こし、絶縁状態となっているであろう。

次に、 $t_3 > 0$  の場合を考える。この時、二つの層は量子的な結合をする。 $\phi$  は、二層間の平均的ポテンシャル差として導入されており、このパラメータが、これらの層を貫く電界の強度に比例することになる。 $\phi$  をパラメータとして系の量子状態がどのように変化していくかが問題となる。

### 【0 0 3 1】

以下に示す数値計算では  $L = 40$  とし、各層に周期的境界条件を用いることにする。全状態数は  $2L^2 = 3200$  である。数値対角化によりエネルギー固有値を求め、上述の方法により量子準位統計量を計算する。量子準位としては  $n = 201$  から  $n = 800$  のものを利用した。以下の計算では、 $t_1 = t_2 = 1$ 、 $t_3 = 0.5$ 、 $V_1 = 2$ 、 $V_2 = 20$  を固定し、 $\phi$  を調整して量子カオス性を制御する。

### 【0 0 3 2】

図 5 に最近接準位間間隔分布  $P(s)$  を、図 6 に  $\Delta_3$  統計量を示した。 $\phi$  の値としては、 $\phi = -4, -2.4, -0.8, 0.8, 2.4, 4$  を用いた。 $\phi =$

ー4の場合、電子はポテンシャルエネルギーの低い第1層に多くの振幅を持って存在する。この時、GOE分布で良く記述される量子カオス状態になっている。 $\phi$ の増加に伴って、ランダムポテンシャルによる散乱の激しい第2層での振幅が増大し、量子準位統計は変化していく。 $\phi=4$ にまでなると、電子はポテンシャルエネルギーの低い第2層に多くの振幅を持って存在し、アンダーソン局在を起こして可積分的なPoisson 分布に従うことが分かる。

### 【0033】

以上の解析から、 $\phi$ の変化、つまりこれらの二層を貫く電界強度の変化によって、この量子系の量子カオス性を制御することができることが分かる。

なお、伝導性に着目している範囲で、アンダーソン局在の状態と金属状態との切替えに関してはSakakiらによる議論がある（上記非特許文献10、11）。

### 【0034】

図7にこの第1の実施形態による量子カオス装置の具体的な構造例を示す。図7に示すように、この量子カオス装置においては、第1層としての結晶層11と第2層としての結晶層12とがトンネルバリアとしての結晶層13を介して量子力学的に結合してヘテロ接合が形成されている。ここで、第1層としての結晶層11はアンドープで高純度、第2層としての結晶層12には不純物が高濃度（例えば $(1\sim 2)\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ）にドーピングされている。そして、結晶層11の裏面に絶縁膜14を介して電極15が形成され、結晶層12の上面に絶縁膜16を介して電極17が形成されている。

### 【0035】

この量子カオス装置は、例えば次のようにして製造することができる。すなわち、図8Aに示すように、基板18上に結晶層11、13、12を順次成長させる。結晶成長法としては、有機金属化学気相成長（MOCVD）法や分子線エピタキシー（MBE）法などを用いることができる。結晶層12には、結晶成長の際に不純物を必要な量だけドーピングする。次に、結晶層12上に絶縁膜16を形成し、さらにその上に導電膜、例えば金属膜を形成して電極17を形成する。次に、図8Bに示すように、基板18を裏面研磨などにより除去する。次に、図8Cに示すように、露出した結晶層11上に絶縁膜14を形成し、さらにその上に導

電膜、例えば金属膜を形成して電極 15 を形成する。次に、この積層構造体をリソグラフィーおよびエッチングにより所定形状にパターンニングする。以上により、図 7 に示す量子カオス装置が得られる。

#### 【0036】

材料の具体例を挙げると、結晶層 11 としてアンドープ GaAs 層、結晶層 12 として Si ドープ GaAs 層、結晶層 13 としてアンドープ AlGaAs 層（Al 組成は例えば 0.3）、絶縁膜 14、16 として SiO<sub>2</sub> 膜、電極 15、17 として Al 膜、基板 18 として半絶縁性 GaAs 基板を用いる。

#### 【0037】

図 9 にこの第 1 の実施形態による量子カオス装置の他の構造例を示す。図 9 に示すように、この量子カオス装置においては、第 1 層としての結晶層 21 と第 2 層としての結晶層 22 とがトンネルバリアとしての結晶層 23 を介して量子力学的に結合してヘテロ接合が形成されている。ここで、第 1 層としての結晶層 21 には格子欠陥が実質的に存在せず（あるいは格子欠陥が極めて少ない）、第 2 層としての結晶層 22 には格子欠陥が少なくとも結晶層 21 よりも多く存在する。さらに、結晶層 21 にはスペーサ層としての結晶層 24、電子供給層としての結晶層 25 および絶縁層としての結晶層 26 が順次接合され、結晶層 22 には絶縁層としての結晶層 27 が接合されている。そして、結晶層 26 の裏面に電極 28 が形成され、結晶層 27 の上面に電極 29 が形成されている。

この量子カオス装置の製造方法は、図 7 に示す量子カオス装置の製造方法とほぼ同様であるので説明を省略する。

#### 【0038】

材料の具体例を挙げると、結晶層 21、22 としてアンドープ GaAs 層、結晶層 23、24、26、27 としてアンドープ AlGaAs 層（Al 組成は例えば 0.3）、結晶層 25 として Si ドープ AlGaAs 層（Al 組成は例えば 0.3）、電極 28、29 として Al 膜を用いる。

#### 【0039】

この図 9 に示す量子カオス装置においては、結晶層 25 から供給される電子が格子欠陥のない結晶層 21 に存在する時、系は金属的に振る舞い、電極 28、2

9 間の電位差によって電子が格子欠陥のある結晶層 22 に引き付けられると、系はアンダーソン局在相へと転移を起こす。

#### 【0040】

以上のように、この第1の実施形態によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域とを結合させてヘテロ接合を形成し、このヘテロ接合に接合界面に垂直な電界を印加することによって、外部から、これらの領域からなる系における電子系の量子カオス性を広範囲にしかも簡便に制御することができる。また、このヘテロ接合は、単一の材料を用いて容易に製造することができる。

#### 【0041】

#### 第2の実施形態

この第2の実施形態による量子カオス装置は、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域との結合系であるヘテロ接合を用いた量子カオス装置であるが、この場合、ランダムポテンシャルを導入するための不純物として特に磁性不純物を用いる。

#### 【0042】

この第2の実施形態を説明する前に、二次元の正方格子上の電子、より詳細には二次元ランダムポテンシャル中の電子状態について説明する。

いま、図1に示すように、一辺がLサイトからなる正方格子を考える。この正方格子のp番目の格子点に量子を生成する演算子

#### 【数23】

$$c_p^\dagger$$

を定義する。ここで、この量子系のハミルトニアン

#### 【数24】

$$\hat{H}_2$$

は以下のように定義される。

## 【数 2 5】

$$\hat{H}_2 = - \sum_{\langle p, q \rangle} t_{p, q} \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_q + \sum_p v_p \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p + \text{H.C.} \quad (18)$$

ただしここで、 $\langle p, q \rangle$  は最近接サイトを意味する。ランダムポテンシャルは  $v_p$  によって導入される。ここで、 $v_p$  は

## 【数 2 6】

$$-V/2 < v_p < V/2 \quad (19)$$

により生成されるランダム変数である。ランダムポテンシャルは、具体的には、例えば、不純物の添加や格子欠陥の導入などにより導入することができる。トランスファース  $t_{p, q}$  は

## 【数 2 7】

$$t_{p, q} = \exp(2\pi i \theta_{p, q}) \quad (20)$$

であり、 $\theta_{p, q}$  は  $\theta_{p, q} = -\theta_{q, p}$  を満たし、 $|\theta_{p, q}| < \xi/2$  により生成されるランダム変数である。 $\xi > 0$  の時にランダム磁場が導入される。

## 【0 0 4 3】

$V$  が充分大きければアンダーソン局在を起こし、絶縁状態となっているであろう。 $V$  が充分小さければ、金属状態のフェルミ液体となる。すでに述べたように、無限の二次元系では、ランダムポテンシャルの強度がどれほど小さくても、ゼロでなければ、すべての一電子状態は局在することが知られている。しかしながら、有限の局在長を有するのであるから、ここで考えている系のサイズ  $L$  より局在長が長ければ、この有限領域内では金属的な状態として振る舞う。

## 【0 0 4 4】

ハミルトニアン

## 【数 2 8】

$$\hat{H}_2$$

の固有エネルギーを

【数 2 9】

$$\epsilon_m$$

、固有ベクトルを  $|m\rangle$  と書くと、

【数 3 0】

$$\hat{H}_2|m\rangle = \epsilon_m|m\rangle \quad (21)$$

である。ただし、 $m=0, 1, 2, \dots, n$ である。

【0 0 4 5】

まず、 $n+1$  個の量子準位

【数 3 1】

$$\epsilon_m$$

を、その最近接準位間間隔が平均で 1 になるように規格化する。つまり、

【数 3 2】

$$\omega_j = \epsilon_j - \epsilon_{j-1} \quad (22)$$

とする。ただし、 $j=1, 2, \dots, n$ としたとき、

【数 3 3】

$$\bar{\omega} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \omega_j \quad (23)$$

を用い、新しい準位

【数 3 4】

$$\epsilon_0 = 0 \quad (24)$$

$$\epsilon_m = \frac{1}{\bar{\omega}} \sum_{j=1}^m \omega_j = \sum_{j=1}^m \Omega_j \quad (25)$$

へ変換する。ここで、

【数 3 5】

$$\Omega_j = \frac{\omega_j}{\bar{\omega}} \quad (26)$$

である。系の状態密度は

## 【数 3 6】

$$\rho(\epsilon) = \frac{1}{n+1} \sum_{m=0}^n \delta(\epsilon - \epsilon_m) \quad (27)$$

で定義され、その積分

## 【数 3 7】

$$\lambda(\epsilon) = \int_{-\infty}^{\epsilon} d\eta \rho(\eta) \quad (28)$$

を計算する。得られたstaircase functionは、アンフォールディングという操作を用いることにより、平均して状態密度が一定になるように変換される。このようにして得られた量子準位を用い、量子準位統計量として最近接準位間間隔分布  $P(s)$  とダイソンとメータの  $\Delta_3$  統計量を計算する。すでに述べたように、これらの統計量を用いることで、量子カオスが発生しているかどうかを検知することができる。

## 【0 0 4 6】

可積分系の場合、最近接準位間間隔分布  $P(s)$  と  $\Delta_3$  統計量はPoisson 分布のもの

## 【数 3 8】

$$P_P(s) = e^{-s} \quad (29)$$

$$\Delta_3(n) = \frac{n}{15} \quad (30)$$

で良く記述され、量子カオス系の場合、GUE (Gaussian unitary ensemble) 分布のもの

## 【数 3 9】

$$P_{\text{GUE}}(s) = \frac{32s^2}{\pi^2} e^{-4s^2/\pi} \quad (31)$$

$$\Delta_3(n) = \frac{1}{2\pi^2} \left[ \log(2\pi n) + \gamma - \frac{5}{4} \right] + O(n^{-1}) \quad (32)$$

で良く記述される。ここで、 $\gamma$  はオイラー定数である。

## 【0 0 4 7】

以下に示す数値計算では  $L = 60$  とし、周期的境界条件を用いることにする。

全状態数は  $L^2 = 3600$  である。量子準位は  $n = 201$  から  $n = 1800$  のものを利用した。 $\xi = 0.1$  を固定し、 $V$  を調整して量子カオス性を制御する。

#### 【0048】

図10に最近接準位間間隔分布  $P(s)$  を、図11に  $\Delta_3$  統計量を示した。 $V$  として  $V = 2, 6, 10, 14, 18, 22$  を用いた。 $V = 2$  の場合、系の量子準位統計はGOEのものでほぼ記述され、金属的な量子カオス状態であることが分かる。詳しく見てみると、量子カオス系からのずれが見てとれる。これは、系が二次元であるため、アンダーソン局在の影響が出ているからである。一方で、 $V = 22$  の場合、系の量子準位統計はPoisson 分布のもので良く記述され、アンダーソン局在状態（可積分系）であることが分かる。 $V = 2$  から  $V = 22$  の変化に伴って、量子カオス系から可積分系への変化が見られている。

#### 【0049】

さて、この第2の実施形態による量子カオス装置について説明する。

第1の実施形態と同様に、図4に示すように、一辺が  $L$  サイトからなる正方格子を二層考える。これらの二層によりヘテロ接合が形成されている。これらの層の最大寸法（格子点間距離を  $a$  とすると  $\sqrt{2}La$ ）は、電子のコヒーレンス長以下である。第1層の  $p$  番目の格子点に量子を生成する演算子

#### 【数40】

$$\hat{c}_p^\dagger$$

を定義する。また、第2層の  $p$  番目の格子点に量子を生成する演算子

#### 【数41】

$$\hat{d}_p^\dagger$$

を定義する。ここで、この量子系のハミルトニアン

#### 【数42】

$$\hat{H}$$

は以下のように定義される。

## 【数 4 3】

$$\begin{aligned} \hat{H} = & - \sum_{\langle p, q \rangle} t_{p, q}^{(1)} \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_q - \sum_{\langle p, q \rangle} t_{p, q}^{(2)} \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_q - \sum_p t_p^{(3)} \hat{c}_p^\dagger \hat{d}_p \\ & + \sum_p v_p \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p + \sum_p w_p \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_p + \frac{\phi}{2} \sum_p (\hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p - \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_p) + \text{H.C.} \end{aligned} \quad (33)$$

ただしここで、 $\langle p, q \rangle$  は最近接サイトを意味する。第 1 層のランダムポテンシャルは  $v_p$  によって導入される。ここで、 $v_p$  は

## 【数 4 4】

$$-V_1/2 < v_p < V_1/2 \quad (34)$$

により生成されるランダム変数である。また、第 2 層のランダムポテンシャルは  $w_p$  によって導入される。ここで、 $w_p$  は

## 【数 4 5】

$$-V_2/2 < w_p < V_2/2 \quad (35)$$

により生成されるランダム変数である。これらのランダムポテンシャルは、具体的には、例えば、不純物の添加や格子欠陥の導入などにより導入することができる。トランスファー

## 【数 4 6】

$$t_{p, q}^{(1)}, t_{p, q}^{(2)}, t_p^{(3)}$$

は

## 【数 4 7】

$$t_{p, q}^{(1)} = t_1 \exp(2\pi i \theta_{p, q}^{(1)}) \quad (36)$$

$$t_{p, q}^{(2)} = t_2 \exp(2\pi i \theta_{p, q}^{(2)}) \quad (37)$$

$$t_p^{(3)} = t_3 \exp(2\pi i \theta_p^{(3)}) \quad (38)$$

であり、

## 【数 4 8】

$$\theta_{p, q}^{(1)} = -\theta_{q, p}^{(1)}, \theta_{p, q}^{(2)} = -\theta_{q, p}^{(2)}$$

を満たし、

## 【数 4 9】

$$|\theta_{p,q}^{(1)}| < \xi/2, |\theta_{p,q}^{(2)}| < \xi/2, |\theta_p^{(3)}| < \xi/2$$

により生成されるランダム変数である。 $\xi > 0$ の時にランダム磁場が導入される。

## 【0 0 5 0】

まず、最も単純な場合である、 $t_3 = 0$ の、第1層と第2層とが分離されている場合を考える。 $V_1 / t_1$ が充分小さければ、第1層は金属状態のフェルミ液体となる。 $V_2 / t_2$ が充分大きければ、第2層はアンダーソン局在を起こし、絶縁状態となっているであろう。

次に、 $t_3 > 0$ の場合を考える。この時、これらの二つの層は量子的な結合をする。 $\phi$ は、二層間の平均的ポテンシャル差として導入されており、このパラメータが、これらの層を貫く電界に比例することになる。 $\phi$ をパラメータとして系の量子状態がどのように変化していくかが問題となる。

## 【0 0 5 1】

以下に示す数値計算では $L = 60$ とし、各層に周期的境界条件を用いることにする。全状態数は $2L^2 = 7200$ である。数値対角化によりエネルギー固有値を求め、上述の方法により量子準位統計量を計算する。量子準位としては $n = 201$ から $n = 1800$ のものを利用した。以下の計算では、 $t_1 = t_2 = 1$ 、 $t_3 = 0.5$ 、 $V_1 = 1$ 、 $V_2 = 12$ 、 $\xi = 0.1$ を固定し、 $\phi$ を調整して量子カオス性を制御する。

## 【0 0 5 2】

図12に最近接準位間間隔分布 $P(s)$ を、図13に $\Delta_3$ 統計量を示した。 $\phi$ の値としては、 $\phi = -4, -2.4, -0.8, 0.8, 2.4, 4$ を用いた。 $\phi = -4$ の場合、電子はポテンシャルエネルギーの低い第1層に多くの振幅を持って存在する。この時、GUE分布で良く記述される量子カオス状態になっている。 $\phi$ の増加に伴って、ランダムポテンシャルによる散乱の激しい第2層での振幅が増大し、量子準位統計は変化していく。 $\phi = 4$ にまでなると、電子はポテンシャルエネルギーの低い第2層に多くの振幅を持って存在し、アンダーソン局在

を起こして可積分的なPoisson 分布に従うことが分かる。

#### 【0 0 5 3】

以上の解析から、 $\phi$  の変化、つまりこれらの二層を貫く電界強度の変化によって、この量子系の量子カオス性を制御することができることが分かる。

上記以外のことは、第 1 の実施形態と同様である。

#### 【0 0 5 4】

以上のように、この第 2 の実施形態によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域とを結合させ、またランダムポテンシャルの導入に磁性不純物の添加を用いてヘテロ接合を形成し、このヘテロ接合に接合界面に垂直な電界を印加することによって、外部から、これらの領域からなる系における電子系の量子カオス性を広範囲にしかも簡便に制御することができる。また、このヘテロ接合は、単一の材料を用いて容易に製造することができる。

#### 【0 0 5 5】

### 第 3 の実施形態

この第 3 の実施形態による量子カオス装置は、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域との結合系であるヘテロ接合を用いた量子カオス装置であるが、この場合、量子カオス性の制御に、電界強度の変化に加えて、電子系のフェルミ準位の設定を用いる。

この量子カオス装置の構成は、電子系のフェルミ準位が所定の値に設定されていることを除いて、第 1 の実施形態による量子カオス装置の構成と同様である。

#### 【0 0 5 6】

第 1 の実施形態で述べた方法により量子準位統計量を計算する。以下に示す数値計算では  $L = 80$  とし、各層に周期的境界条件を用いることにする。全状態数は  $2L^2 = 12800$  である。数値対角化によりエネルギー固有値を求め、量子準位統計量を計算する。以下の計算では、 $t_1 = t_2 = 1$ 、 $t_3 = 0.5$ 、 $V_1 = 2$ 、 $V_2 = 20$  を固定し、 $\phi$  を調整して量子カオス性を制御する。

#### 【0 0 5 7】

まず、量子準位として  $n = 201$  から  $n = 3200$  のものを利用した計算例を示す。図 14 に最近接準位間間隔分布  $P(s)$  を、図 15 に  $\Delta_3$  統計量を示した。 $\phi$  の値としては、 $\phi = -6, -3.6, -1.2, 1.2, 3.6, 6$  を用いた。 $\phi = 6$  の場合、電子はポテンシャルエネルギーの低い第 2 層に多くの振幅を持って存在し、アンダーソン局在を起こして可積分的な Poisson 分布に従うことが分かる。 $\phi$  の減少に伴って、ランダムポテンシャルによる散乱が比較的弱い第 1 層に大きな振幅を持つようになり、量子準位統計は変化していく。 $\phi = -6$  にまでなると、金属的であり、GOE 分布で良く記述される量子カオス状態になる。

### 【0058】

以上の解析から、 $\phi$  の変化、つまりこれらの二層を貫く電界強度の変化によって、この量子系の量子カオス性を制御することができることが分かる。

さて、この量子カオス性の変調を定量的に調べるため、Berry-Robnik パラメータ  $\rho$  を導入する（非特許文献 14）。まず、

### 【数 50】

$$\bar{\rho} = 1 - \rho$$

としたとき、

### 【数 51】

$$P_2(s, \rho) = \rho^2 e^{-\rho s} \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi \bar{\rho}} s}{2}\right) + \left(2\rho \bar{\rho} + \frac{\pi \bar{\rho}^3 s}{2}\right) e^{-\rho s - \pi \bar{\rho}^2 s^2 / 4} \quad (39)$$

を導入する。ただし、

### 【数 52】

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty d\tau e^{-\tau^2} \quad (40)$$

を用いた。この関数  $P_2(s, \rho)$  は、 $\rho = 1$  の時 Poisson 分布の  $P(s)$  と一致し、 $\rho = 0$  の時 GOE 分布の  $P(s)$  と一致する。つまり、 $\rho$  を 0 から 1 へと変化させることで、量子カオス系から可積分系までの量子準位統計を内挿することができる。さて、Berry-Robnik パラメータとは、数値計算によって得られた  $P(s)$  を、上記  $P_2(s, \rho)$  で最適に近似した場合の  $\rho$  の値である。準古典近

似の範囲で  $\rho$  は、位相空間における正則領域（可積分系とそれから摂動展開可能な領域）の体積比である（非特許文献 15）。従って、ここで議論しているアンダーソン局在系においては、局在状態の体積比とみなすことができる。

#### 【0059】

上記の系におけるBerry-Robnikパラメータを図 16 に示す。 $\phi$  の大きな領域でBerry-Robnikパラメータが大きな値を取り、局在性が大きいことを示している。 $\phi$  の減少に伴いBerry-Robnikパラメータは減少し、 $\phi = -2$  においてはほぼ  $\rho = 0$  に到達し、系が量子カオスの性質を示すことを意味している。

さて、このデータは  $n = 201$  から  $n = 3200$  の広いエネルギー領域に関する平均的な性質を表すものであった。

#### 【0060】

ここで、電子系のフェルミ準位の設定による量子カオスの制御のために、量子準位統計のエネルギー依存性を詳しく検討する。図 17 に、 $n = 201$  から  $n = 1200$  までの 1000 状態を用いて量子準位統計を計算した後、Berry-Robnikパラメータを決定したもの、同様に  $n = 1201$  から  $n = 2200$  までの 1000 状態を用いた場合、 $n = 2201$  から  $n = 3200$  までの 1000 状態を用いた場合を示す。この三例から明らかなように、 $201 - 1200$  の比較的低いエネルギーの状態を解析した場合は、比較的小さな  $\phi$  の値においても大きなBerry-Robnikパラメータが得られており、量子局在の性質が見られている。 $1201 - 2200$  のエネルギーへ進むと、アンダーソン転移が起きる  $\phi$  がより大きくなり、その傾向は  $2201 - 3200$  のエネルギーにおいてより顕著である。

#### 【0061】

この結果を電子系に当てはめた場合、電極間に印加する電圧などを制御することによって、この系の電子系のフェルミ準位が  $n = 201$  から  $n = 1200$  の間に位置する場合、電子系の応答は図 17 の  $201 - 1200$  のデータによって良く記述されるであろう。また、この系の電子系のフェルミ準位が  $n = 1201$  から  $n = 2200$  の間に位置する場合、電子系の応答は図 17 の  $1201$  から  $2200$  のデータによって良く記述されるであろう。そして、この系の電子系のフェルミ準位が  $n = 2201$  から  $n = 3200$  の間に位置する場合、電子系の応答は

図17の2201から3200のデータによって良く記述されるであろう。このことから、低いエネルギーにおいてより局在傾向が大きいのであり、電子系のフェルミ準位を制御することにより、電界効果によるアンダーソン転移の起こる臨界的な電位  $\phi_c$ 、つまり電界強度を制御することができることが分かる。

上記以外のことは、第1の実施形態と同様である。

#### 【0062】

以上のように、この第3の実施形態によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域とを結合させてヘテロ接合を形成し、このヘテロ接合に接合界面に垂直な電界を印加することに加えて、この系の電子系のフェルミ準位をこの電子系の密度の制御により所定の値に設定することによって、外部から、これらの領域からなる系における電子系の量子カオス性をより広範囲にしかも簡便に制御することができる。また、このヘテロ接合は、単一の材料を用いて容易に製造することができる。

#### 【0063】

#### 第4の実施形態

この第4の実施形態による量子カオス装置は、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域との結合系であるヘテロ接合を用いた量子カオス装置であるが、この場合、両領域内のトランスファーに比べて両領域間のトランスファーを小さく設定することにより、量子カオスに伴うアンダーソン転移が急峻に起こるようにする。

この量子カオス装置の構成は、上記のようにトランスファーが設定されていることを除いて、第1の実施形態による量子カオス装置の構成と同様である。

#### 【0064】

第1の実施形態で述べた方法により量子準位統計量を計算し、量子カオス性の変調を定量的に調べるためにBerry-Robnikパラメータ  $\rho$  を導入する。以下に示す数値計算では  $L = 80$  とし、各層に周期的境界条件を用いることにする。全状態数は  $2L^2 = 12800$  である。数値対角化によりエネルギー固有値を求め、量子準位統計量を計算する。以下の計算では、 $t_1 = t_2 = 1$ 、 $V_1 = 2$ 、 $V_2 =$

20を固定し、 $\phi$ を調整して量子カオス性を制御する。 $t_3 = 1/2, 1, 2, 4, 8$ を用いた。量子準位としては $n = 1201$ から $n = 3200$ のものを利用した。Berry-Robnikパラメータを図18に示す。図18において $t_3 = 1/2$ を見ると、 $\phi$ の大きな領域でBerry-Robnikパラメータが大きな値を取り、局在性が大きいことを示している。 $\phi$ の減少に伴いBerry-Robnikパラメータは減少し、 $\phi = -2$ においてはほぼ $\rho = 0$ に到達し、系が量子カオスの性質を示すことを意味している。 $t_3$ が大きくなるにつれて、変調性が乏しくなることが分かる。特に $t_3 = 4$ 程度以上では、 $\phi$ に対する関数形が変わり、線形的になっているのが分かる。

#### 【0065】

ここで、無限系のアンダーソン転移を復習する。純粋な二次元系では、絶対零度において、ランダムポテンシャルの強度がどれほど弱くてもゼロでない限り、全ての一電子量子状態が局在して系は常に絶縁体として振る舞う。有限温度においては、コヒーレンス長が有限になるため、伝導性が生じるが、ランダムポテンシャルの弱い領域（弱局在領域）において、量子位相干渉効果による伝導度の補正項は、ランダムポテンシャル強度に依存しないことが知られている。さてこの系に戻って考えると、 $t_3$ が充分大きい場合、第1層と第2層との結合状態と反結合状態とが互いに充分分離することになる。このとき、例えばフェルミ準位が結合状態に位置していたとすれば、この結合状態は純粋な二次元量子極限と考えることができる。電界効果によりランダムポテンシャル強度は変調されるが、この電子状態への影響が小さいことが、上記の議論から予想される。 $t_3$ が小さくなるに従って、第1層と第2層との量子状態が混じって純粋な二次元系ではなくなってくると、急峻な金属／絶縁体の相転移が見られるのである。この場合、 $t_1 = 1$ 、 $t_2 = 1$ であった。従って、両層のバンド幅はそれぞれ4であって、これに比べて充分小さい $t_3$ の時に、急峻なアンダーソン転移が見られる。

#### 【0066】

次に、Inverse participation ratio（逆関与率）による解析について説明する。

アンダーソン転移の解析において、従来からしばしば用いられるInverse part

icipation ratio とは、以下に定義される量である。

【数 5 3】

$$\alpha_m = \sum_{\mathbf{r}} |\phi_m(\mathbf{r})|^4 \quad (41)$$

ここで、

【数 5 4】

$\phi_m(\mathbf{r})$

は固有エネルギー

【数 5 5】

$\epsilon_m$

の波動関数であり、 $\mathbf{r}$  は格子点を示す。つまり、 $m$  番目のエネルギー固有状態の波動関数を四乗して空間積分したものである。ランダムポテンシャル強度が空間的に一定である場合、この量を解析することによって、系のアンダーソン転移の様子が分かる。簡単にその理由を見ると次のとおりである。局在状態の典型として体積が  $\omega$  の領域  $\Omega$  内に局在している波動関数として

【数 5 6】

$$\phi_m(\mathbf{r}) = \begin{cases} 1/\sqrt{\omega} & \text{when } \mathbf{r} \in \Omega \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (42)$$

を考える。このとき Inverse participation ratio は

【数 5 7】

$$\alpha_m = \int_{\Omega} dV \frac{1}{\omega^2} = \frac{1}{\omega} \quad (43)$$

となる。従って、局在している体積に反比例し、金属状態になるとゼロへと漸近する量である。

【0067】

この量をこの系において計算する。ここでは  $L = 40$  とし、 $N = 2 \times 40^2 = 3200$  が総状態数となる。 $\alpha_m$  そのものは分布しているので、この量をエネルギーのウィンドウ内で平均化した量を定義して解析することが便利である。

【0068】

## 【数 58】

$$\alpha(E, W) = \frac{1}{\mu(E, W)} \sum_{m \in \Omega(E, W)} \alpha_m \quad (44)$$

を導入する。ここで、

## 【数 59】

$$\Omega(E, W) = \{m | E - W/2 < \epsilon_m < E + W/2\} \quad (45)$$

である。これはつまり、エネルギー固有値

## 【数 60】

$\epsilon_m$

が  $E$  を中心に幅  $W$  の間に入る状態を意味し、その状態数を  $\mu(E)$  と書くことにする。ここでは、 $W = 0.4$  を用いた。

## 【0069】

図 19 には  $t_3 = 1/2$  の場合、図 20 には  $t_3 = 1$  の場合、図 21 には  $t_3 = 2$  の場合、図 22 には  $t_3 = 4$  の場合、図 23 には  $t_3 = 8$  の場合を示した。これらの図では、 $\phi = -6$ 、 $\phi = -4$ 、 $\phi = -2$ 、 $\phi = 0$ 、 $\phi = 2$ 、 $\phi = 4$ 、 $\phi = 6$  を用いた。それぞれ順番に  $0.4$  ずつ、縦方向にずらして表現してある。急峻な相転移が見られる図 19 の場合、 $\alpha(E, W)$  がほぼゼロを示す領域が存在して、その領域が  $\phi$  とともに移動することにより、金属／絶縁体の相転移が発生している。一方で、 $t_3$  が大きい場合、 $\alpha(E, W)$  がほぼゼロをとる領域そのものがなくなり、常に局在的な傾向を全てのエネルギー領域において見てとることができる。これは二次元量子極限の効果と考えることができる。

## 【0070】

図 24 に、 $t_3$  の小さな物理系としての量子カオス装置の具体例を示す。

図 24 に示すように、この量子カオス装置においては、例えばアンドープ AlGaAs からなる絶縁層 31、例えば GaAs からなる局在層 32、例えばアンドープ AlGaAs からなる障壁層（トンネルバリア）33、例えばアンドープ AlGaAs からなる伝導層 34 および例えばアンドープ AlGaAs からなる絶縁層 35 が順次積層されており、下から順に AlGaAs/GaAs/AlGaAs/AlGaAs/AlGaAs のヘテロ接合が形成されている。ここで、

局在層 3 2 においては不純物の添加や格子欠陥の導入などによりランダムポテンシャルが導入されているが、その他の層にはランダムポテンシャルは導入されていないか、導入されていても無視することができるレベルである。この局在層 3 2 は、ランダムポテンシャルの導入を格子欠陥の導入により行う場合には、アンドープとすることができる。この局在層 3 2 はアンダーソン局在を示す層であり、伝導層 3 4 は金属的状态を示す層である。また、伝導層 3 4 を構成する A 1 G a A s の A 1 組成は、この伝導層 3 4 の伝導帯の下端のエネルギーが局在層 3 2 の伝導帯の下端のエネルギーより少し高いが、障壁層 3 3 および絶縁層 3 5 の伝導帯の下端のエネルギーより充分に低くなるように選ばれる。図示は省略するが、絶縁層 3 5 上および絶縁層 3 1 の裏面にそれぞれ電極が形成されており、これらの電極間に電圧を印加することにより、 $z$  軸方向の電界を印加することができるようになっている。

図 2 5 に、この量子カオス装置のヘテロ界面に垂直な方向のエネルギーバンド図を示す。図 2 5 において、 $E_c$  は伝導帯の下端のエネルギー、 $E_v$  は価電子帯の上端のエネルギーを示す。

#### 【0071】

以上のように、この第 4 の実施形態によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域とを結合させてヘテロ接合を形成し、この際、両領域間のトランスファーが両領域内のトランスファーより小さく、好適には充分に小さくなるようにし、このヘテロ接合に接合界面に垂直な電界を印加することによって、外部から、これらの領域からなる系における電子系の量子カオス性およびアンダーソン転移をより広範囲にしかも簡便に制御することができ、また、急峻にアンダーソン転移を起こさせることができる。また、このヘテロ接合は、単一の材料を用いて容易に製造することができる。

#### 【0072】

以上、この発明の実施形態につき具体的に説明したが、この発明は、上述の実施形態に限定されるものではなく、この発明の技術的思想に基づく各種の変形が可能である。

例えば、上述の実施形態において挙げた数値、構造、形状、材料などはあくまでも例に過ぎず、必要に応じてこれらと異なる数値、構造、形状、材料などを用いてもよい。

### 【0073】

#### 【発明の効果】

以上説明したように、この発明によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第1の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第2の領域とを、それらの間で電子の授受が可能な状態で互いに隣接して設けることによりヘテロ接合を形成し、このヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、これらの第1の領域および第2の領域からなる系における電子系の量子カオス性を広範囲にしかも外部から制御することができ、また単一の材料を用いてもこのような広範囲の制御が可能である。また、トランスファの適切な設定により、アンダーソン転移を急峻に起こさせることができる。また、電界印加に加えて電子系のフェルミ準位の制御を併用することによって、電子系の量子カオス性をより広範囲に制御することができる。

#### 【図面の簡単な説明】

##### 【図1】

二次元ランダムポテンシャル中の電子状態を説明するための略線図である。

##### 【図2】

図1に示すモデルを用いてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

##### 【図3】

図1に示すモデルを用いてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

##### 【図4】

この発明の第1の実施形態による量子カオス装置の要部を模式化して示す略線図である。

##### 【図5】

この発明の第1の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示

す略線図である。

【図 6】

この発明の第 1 の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図 7】

この発明の第 1 の実施形態による量子カオス装置の具体的な構造例を示す断面図である。

【図 8】

この発明の第 1 の実施形態による量子カオス装置の製造方法を説明するための断面図である。

【図 9】

この発明の第 1 の実施形態による量子カオス装置の他の構造例を示す断面図である。

【図 1 0】

図 1 に示すモデルを用いてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図 1 1】

図 1 に示すモデルを用いてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図 1 2】

この発明の第 2 の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図 1 3】

この発明の第 2 の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図 1 4】

この発明の第 3 の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図 1 5】

この発明の第3の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図16】

この発明の第3の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図17】

この発明の第3の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図18】

この発明の第4の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図19】

この発明の第4の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図20】

この発明の第4の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図21】

この発明の第4の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図22】

この発明の第4の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図23】

この発明の第4の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図24】

この発明の第4の実施形態による量子カオス装置の具体的な構造例を示す斜視図である。

## 【図 25】

この発明の第4の実施形態による量子カオス装置のエネルギーバンド図である

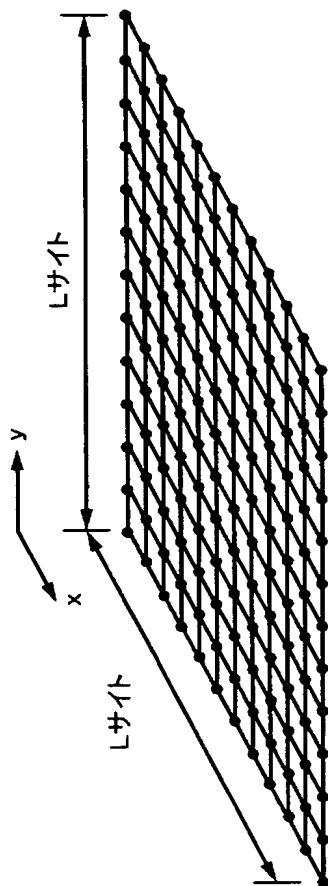
。

## 【符号の説明】

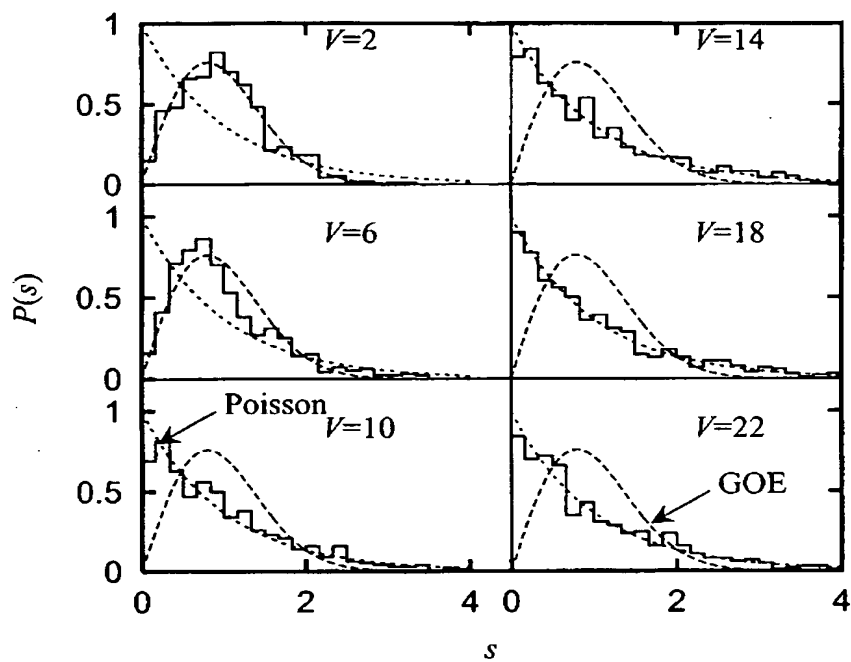
11、12、13…結晶層、14、16…絶縁膜、15、17…電極、18…  
基板、21～27…結晶層、28、29…電極、31、35…絶縁層、32…局  
在層、33…障壁層、34…伝導層

【書類名】 図面

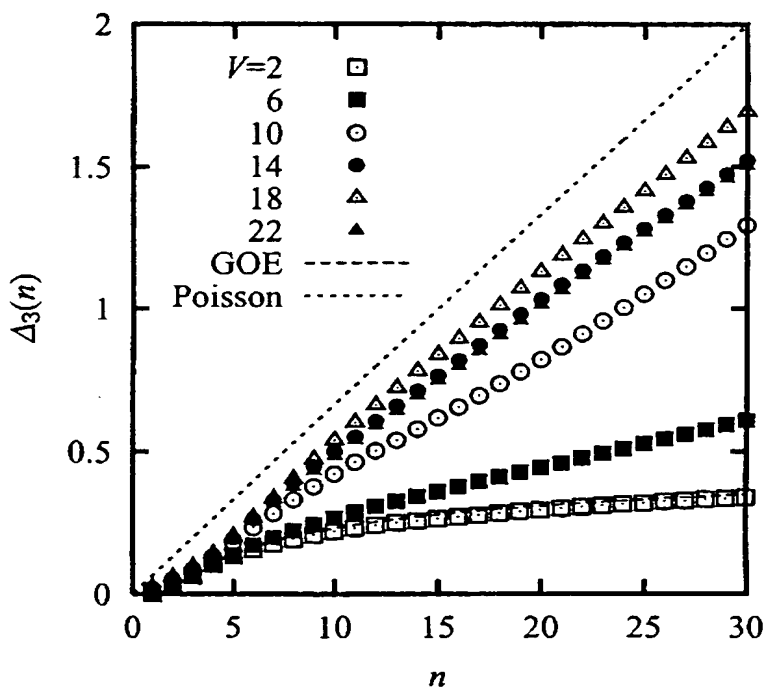
【図 1】



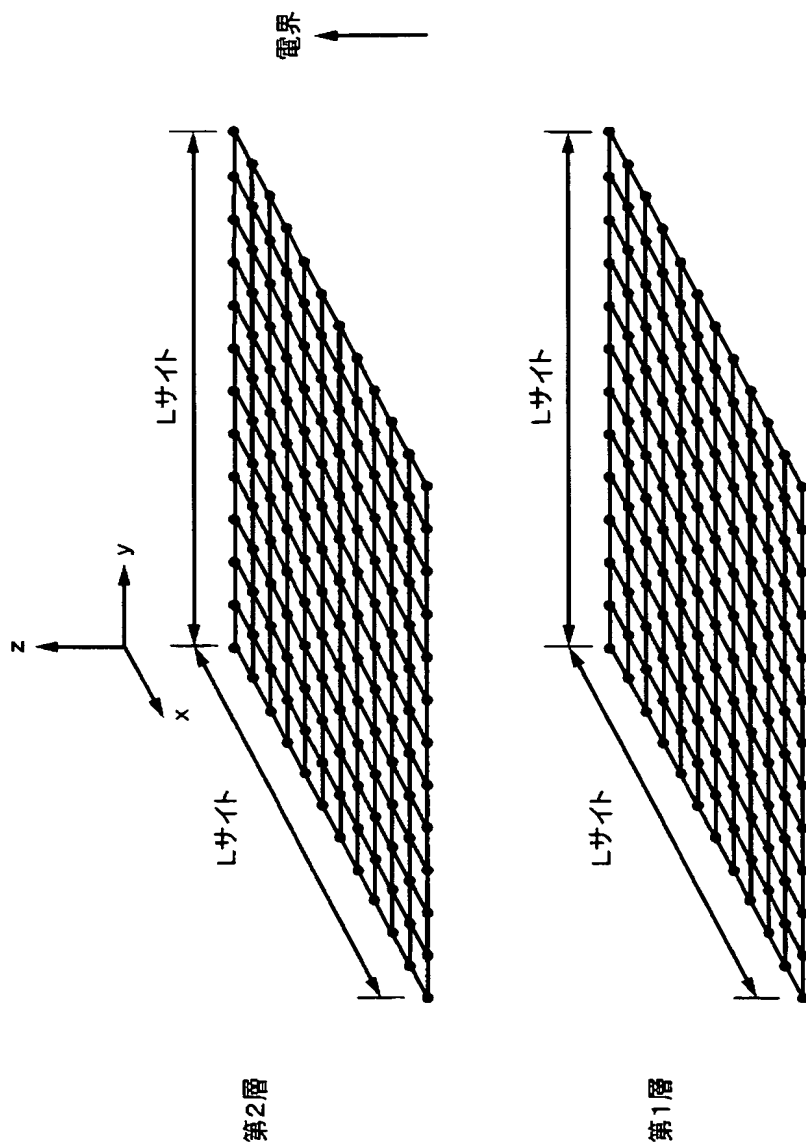
【図 2】



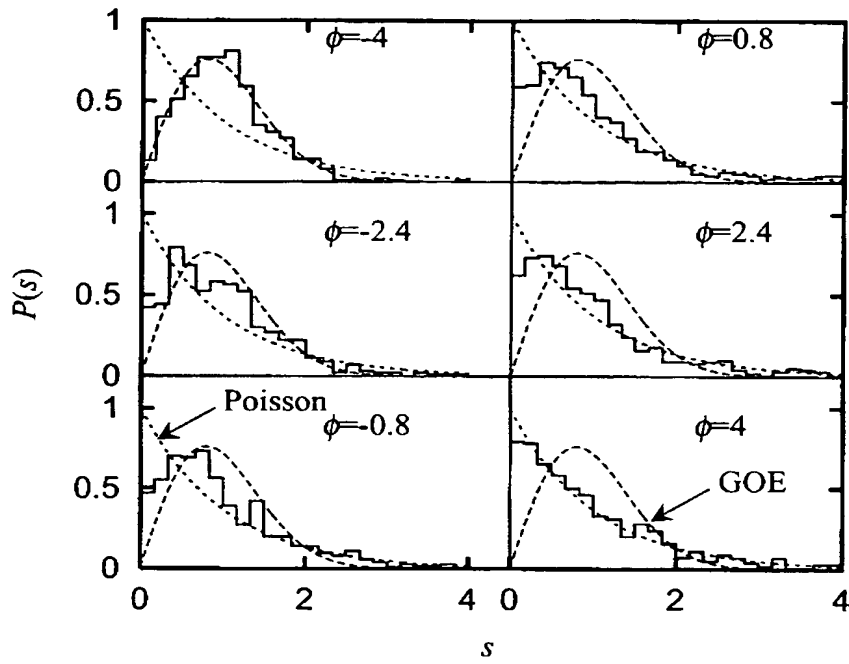
【図 3】



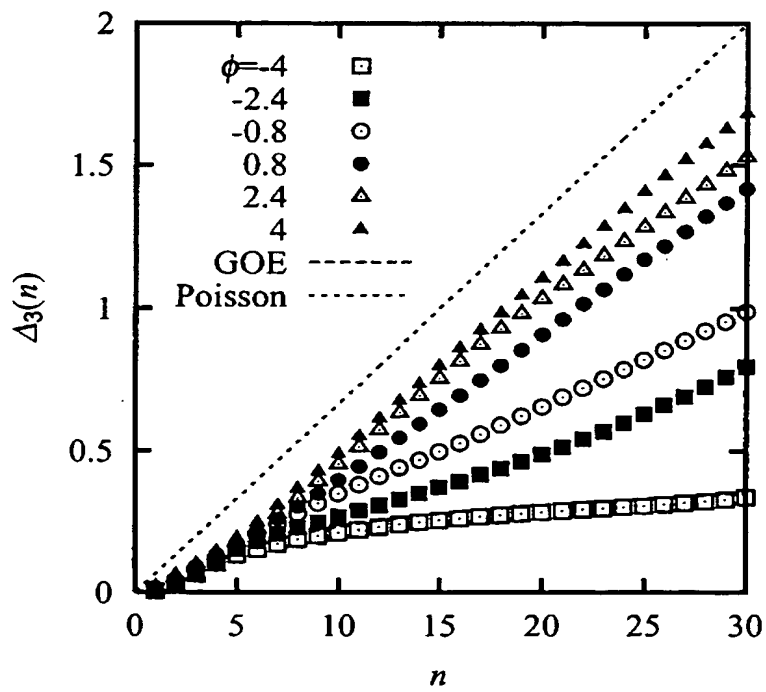
【図 4】



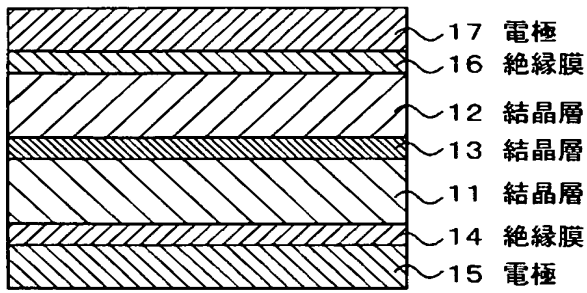
【図 5】



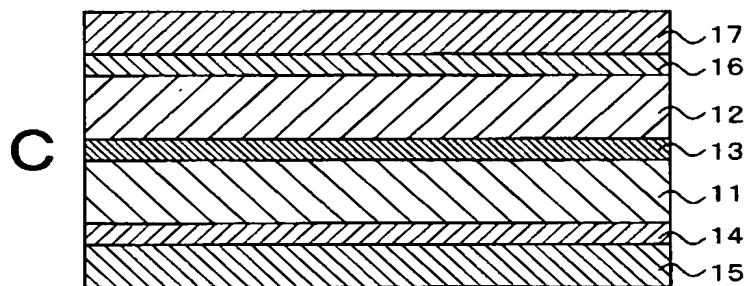
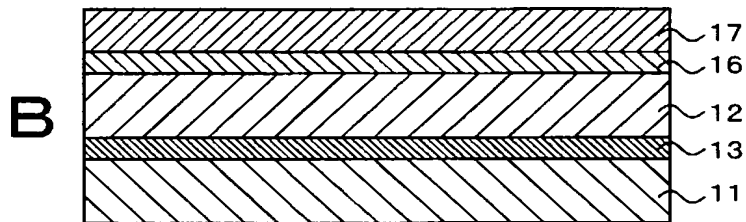
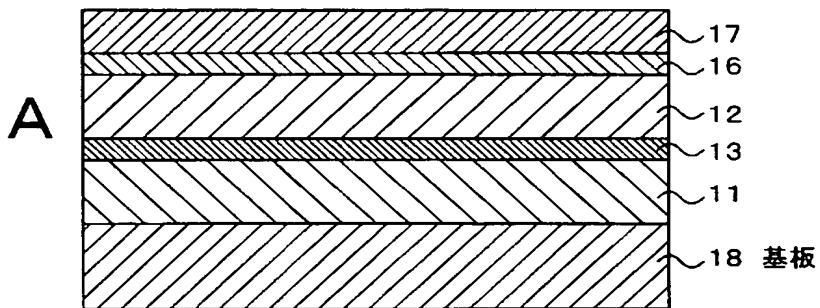
【図 6】



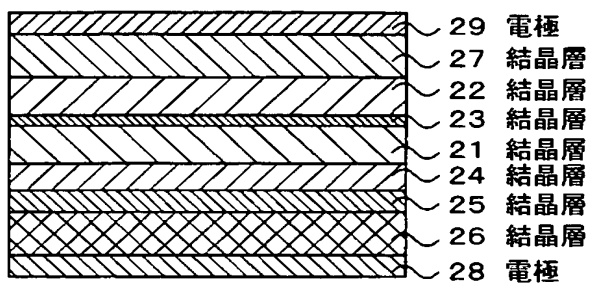
【図 7】



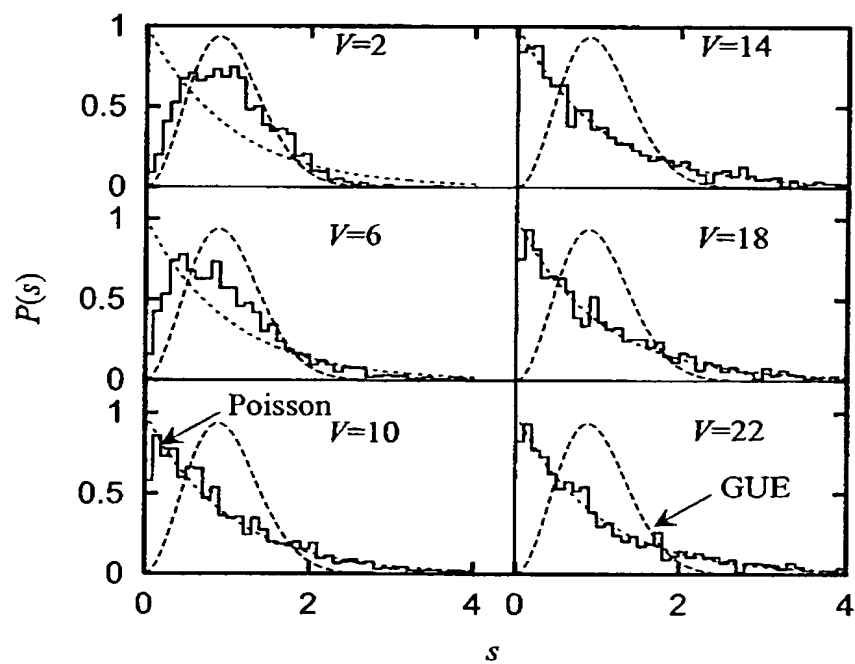
【図 8】



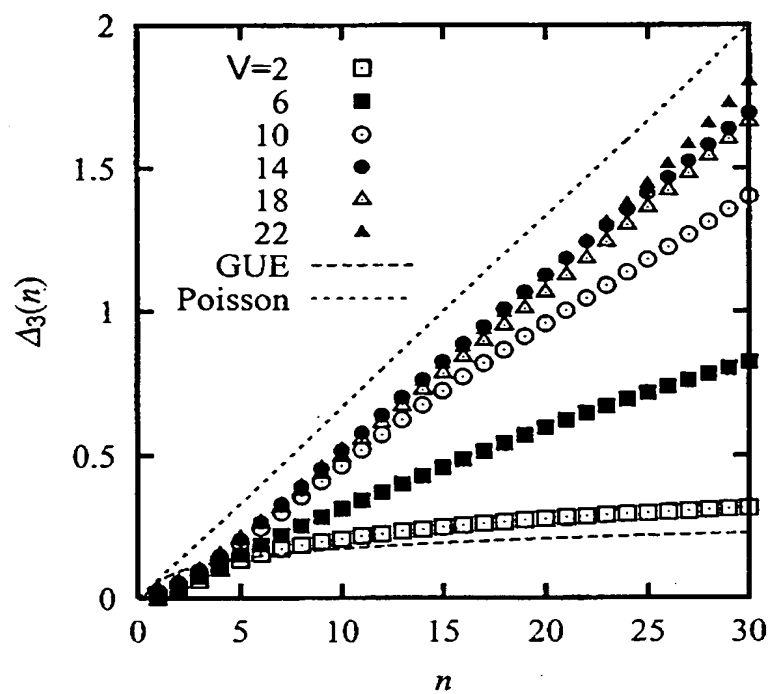
【図 9】



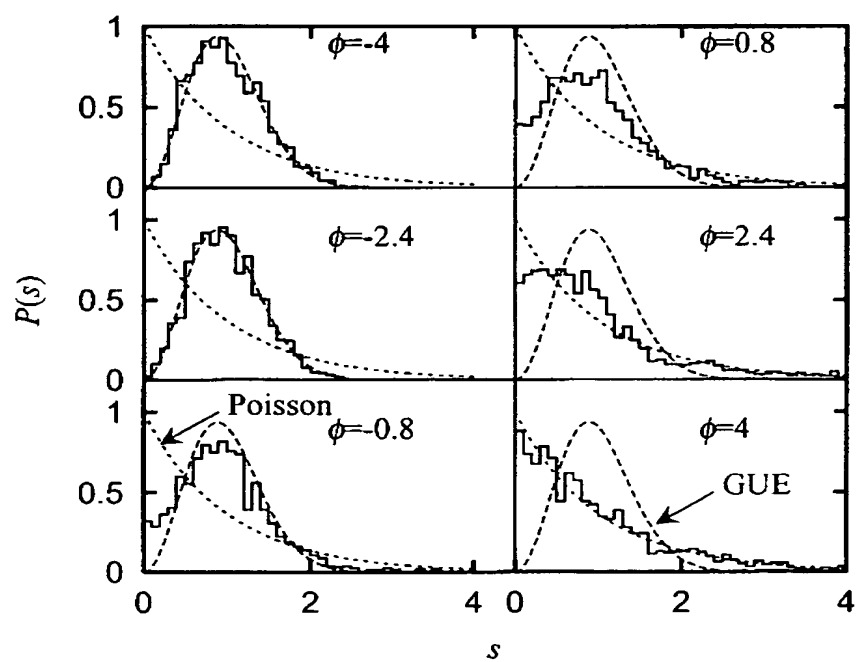
【図 10】



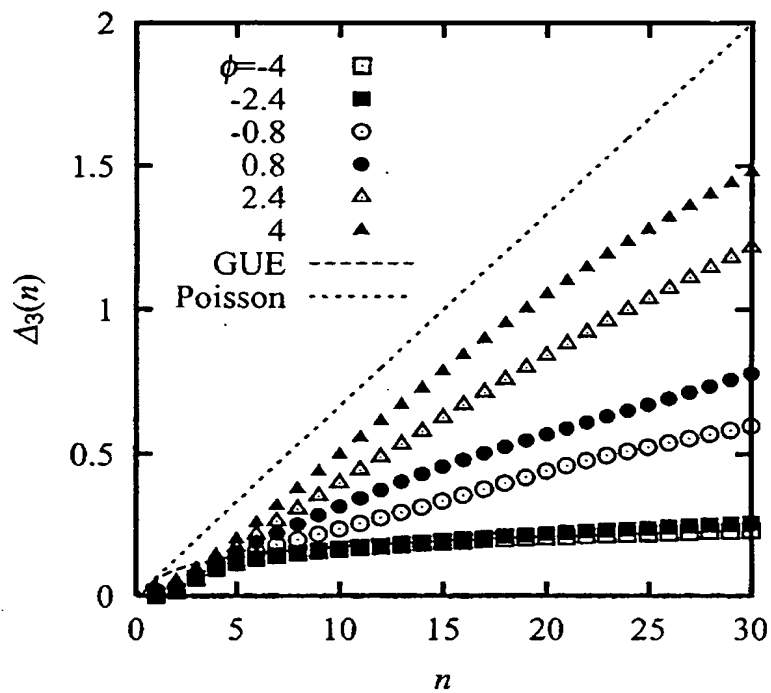
【図 1 1】



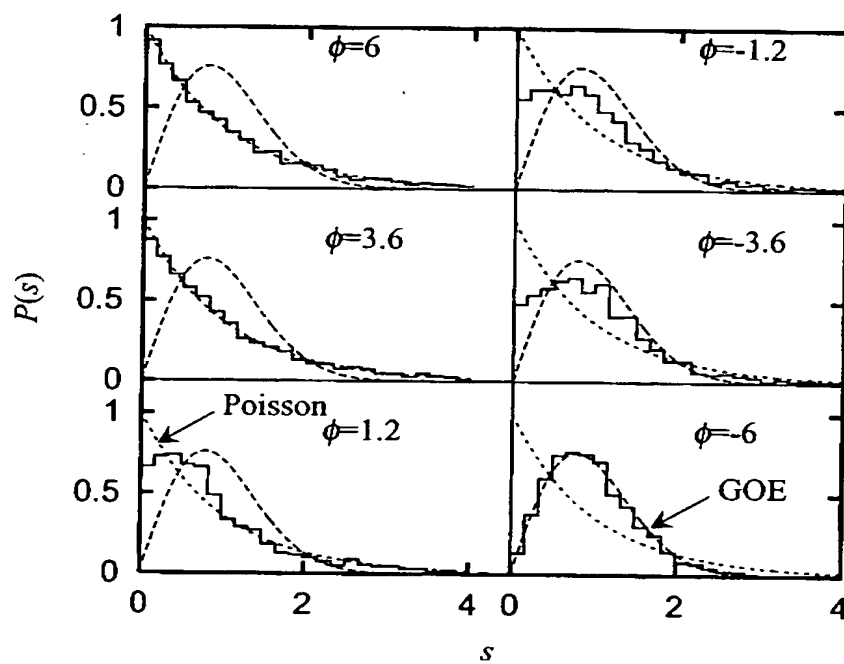
【図 1 2】



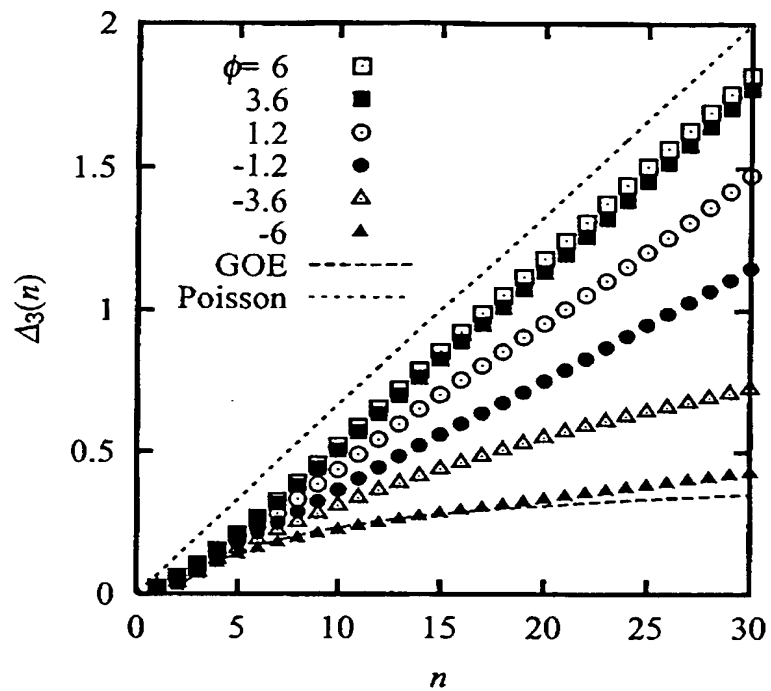
【図 13】



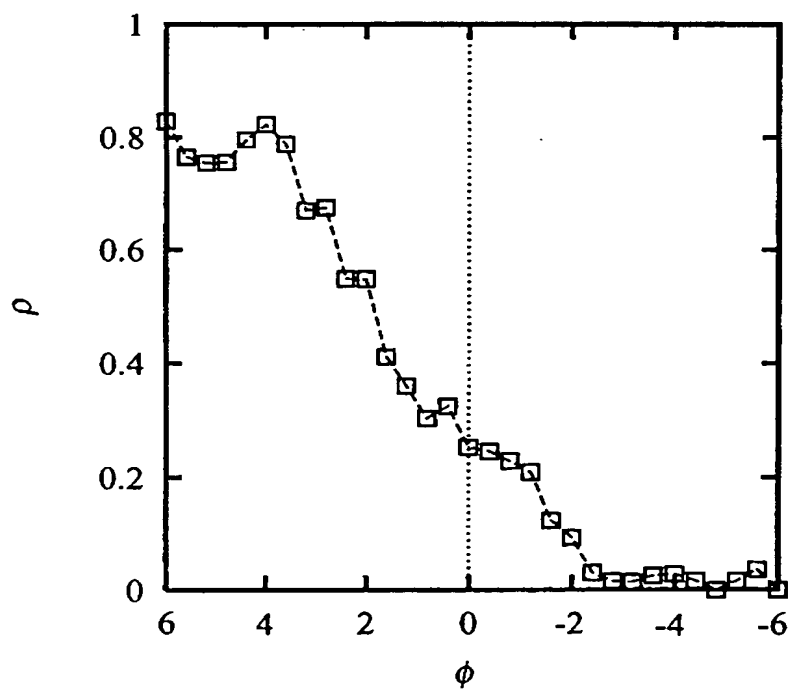
【図 14】



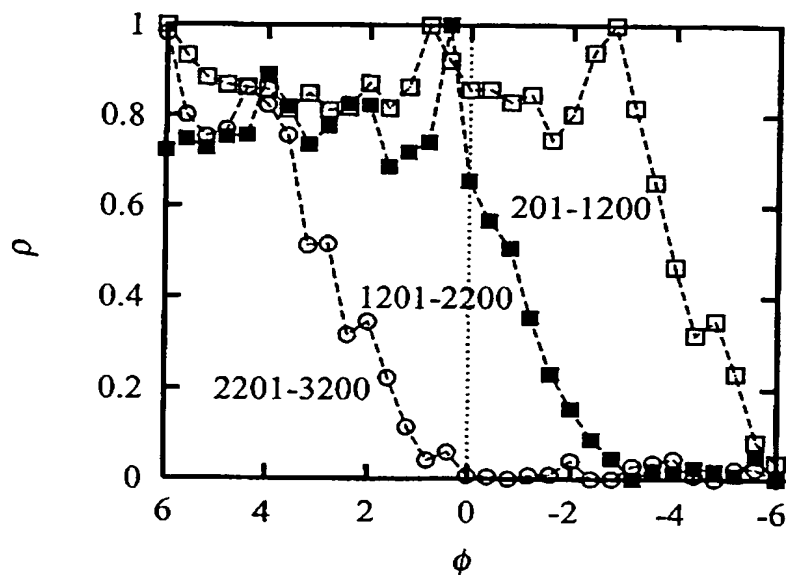
【図 15】



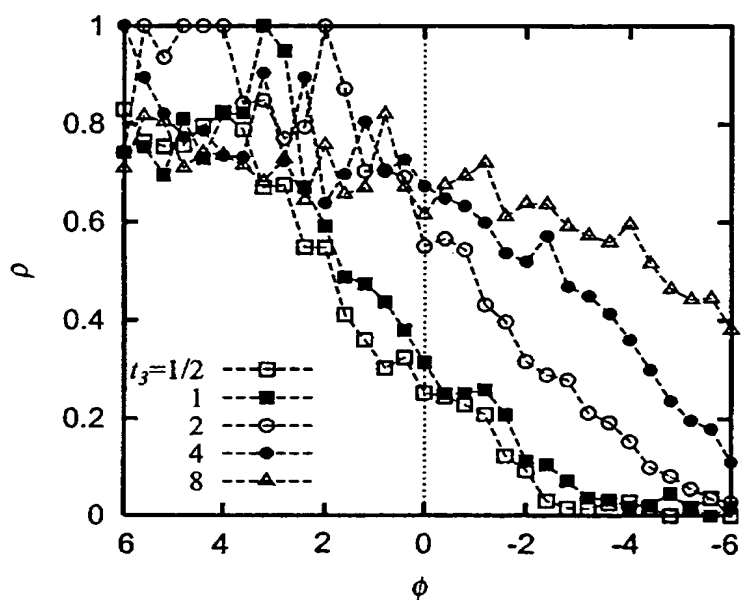
【図 16】



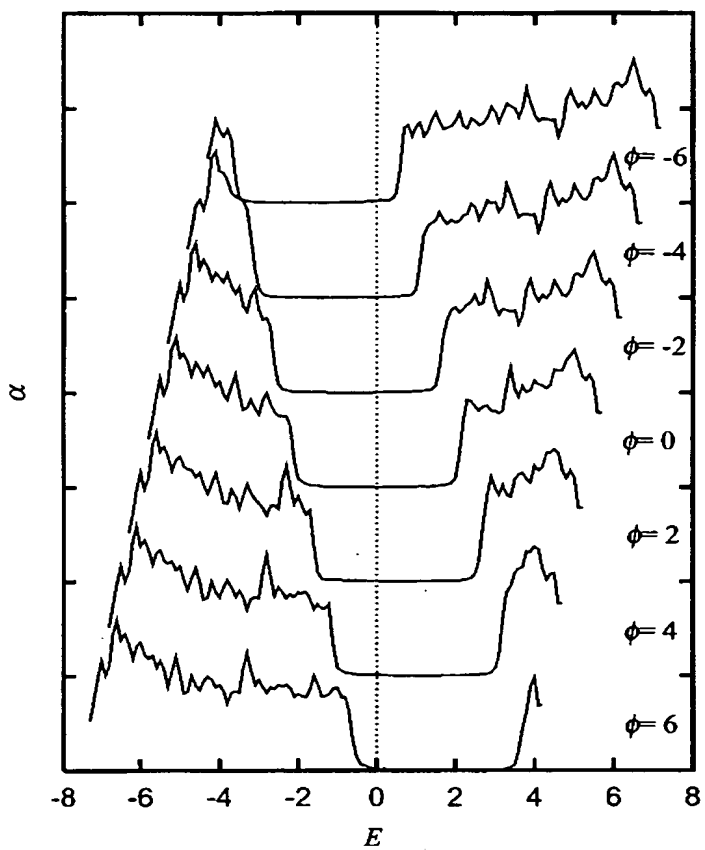
【図 17】



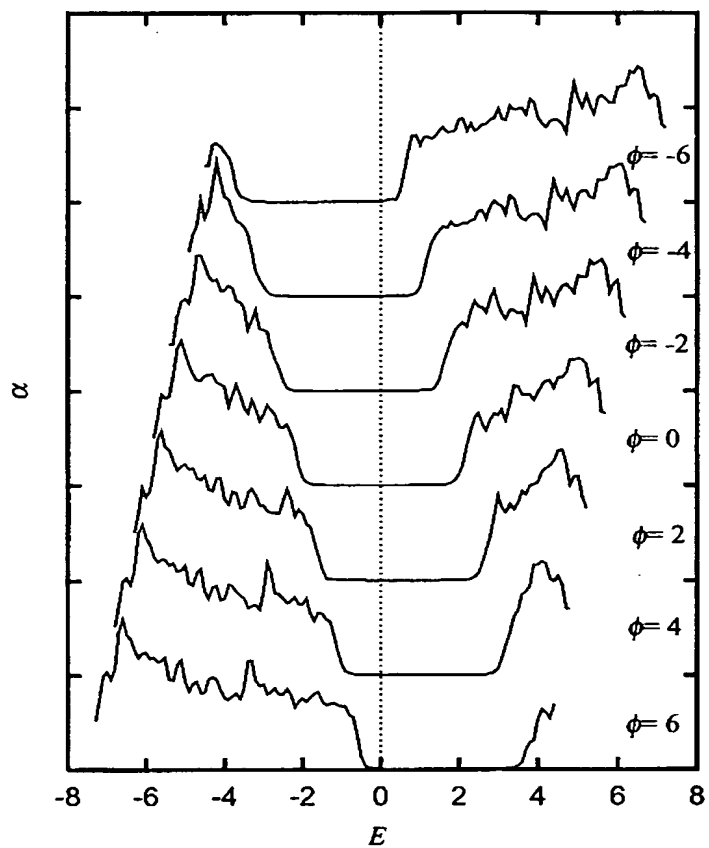
【図 18】



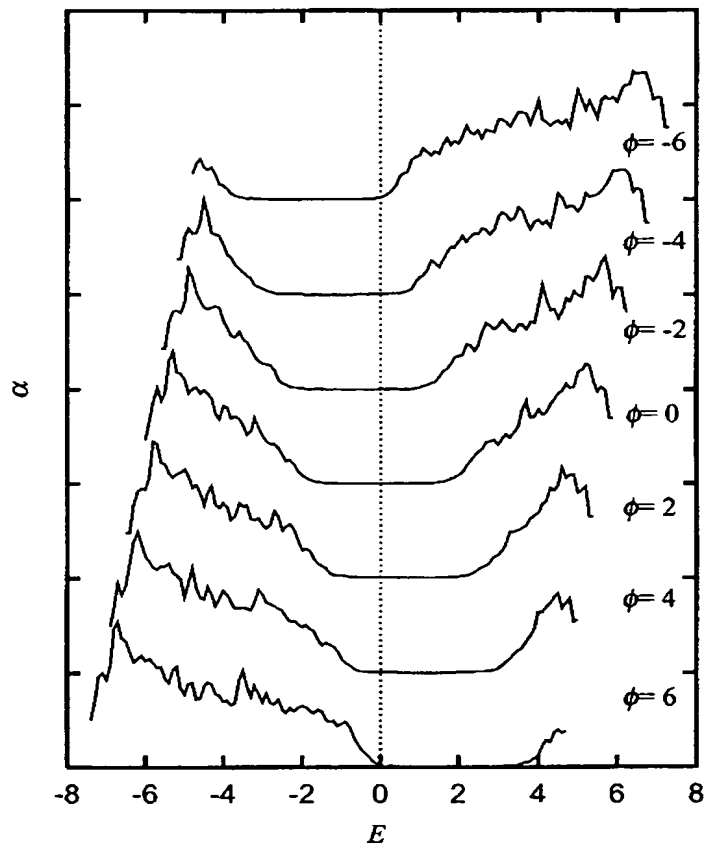
【図 19】



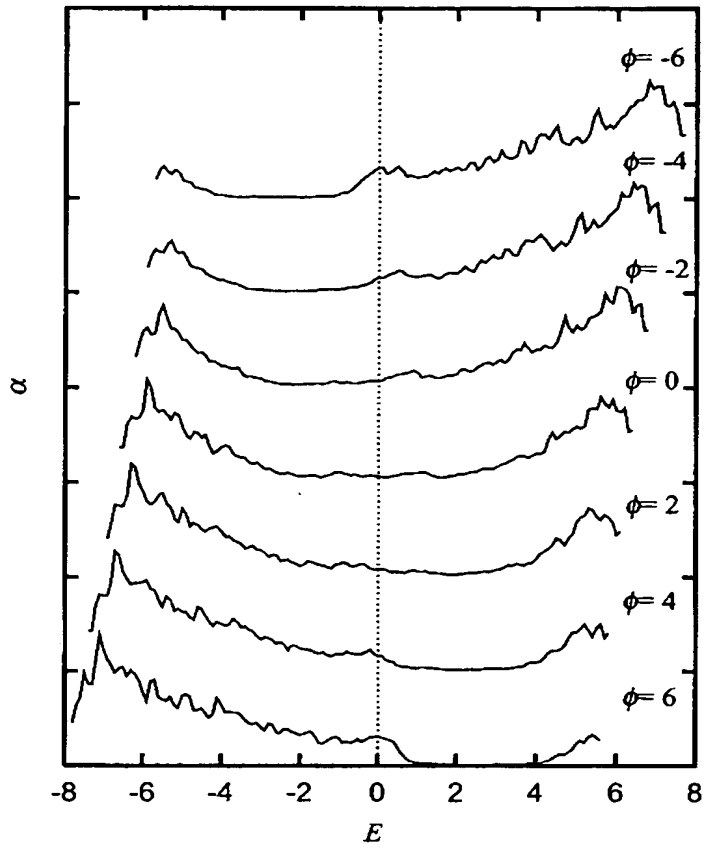
【図 20】



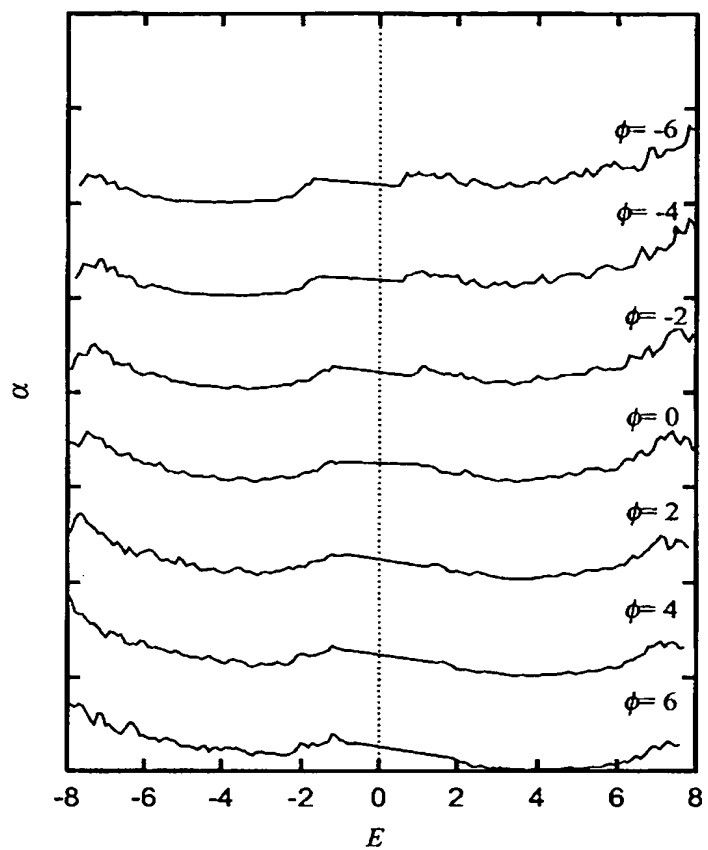
【図 21】



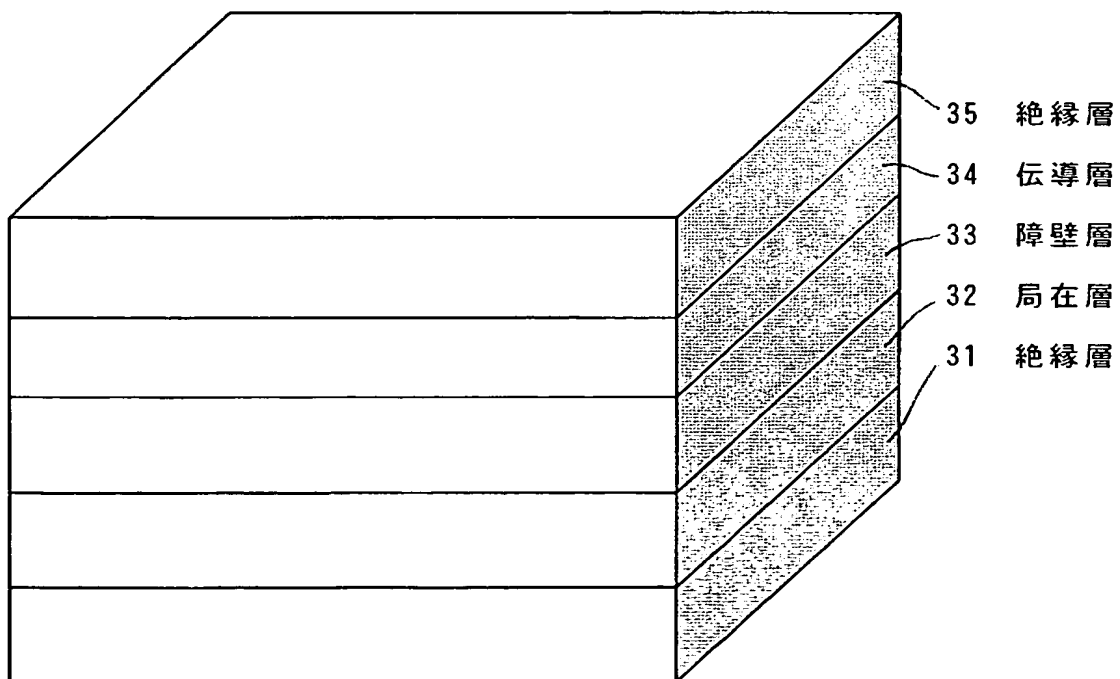
【図 22】



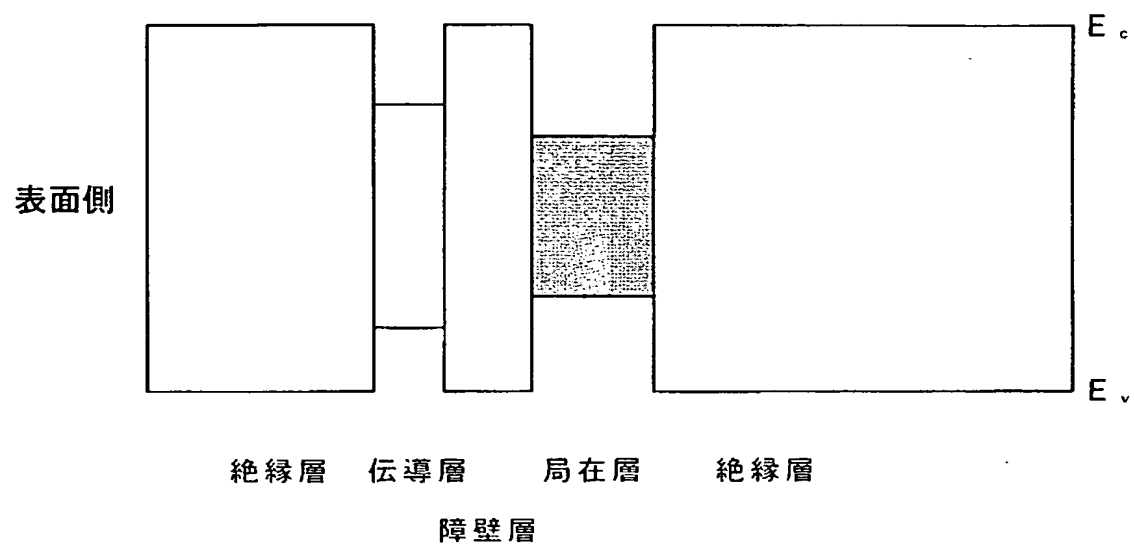
【図 23】



【図 24】



【図 2 5】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 量子カオス性を広範囲に、しかも外部から制御することができ、また単一の材料を用いてもそのような広範囲の制御が可能な量子カオス装置を提供する。

【解決手段】 量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第1の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第2の領域とを、それらの間で電子の授受が可能な状態で互いに隣接して設けてヘテロ接合を形成し、このヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、第1の領域および第2の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御する。

【選択図】 図4

## 認定・付加情報

特許出願の番号	特願 2003-141659
受付番号	50300833705
書類名	特許願
担当官	第五担当上席 0094
作成日	平成15年 5月23日

## &lt;認定情報・付加情報&gt;

## 【特許出願人】

【識別番号】	000002185
【住所又は居所】	東京都品川区北品川6丁目7番35号
【氏名又は名称】	ソニー株式会社

## 【代理人】

申請人

【識別番号】	100082762
【住所又は居所】	東京都豊島区南池袋二丁目49番7号 池袋パークビル7階
【氏名又は名称】	杉浦 正知

## 【選任した代理人】

【識別番号】	100120640
【住所又は居所】	東京都豊島区南池袋2-49-7 池袋パークビル7階 杉浦特許事務所
【氏名又は名称】	森 幸一

次頁無

特願 2 0 0 3 - 1 4 1 6 5 9

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[ 0 0 0 0 0 2 1 8 5 ]

1 . 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 3 0 日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 3 5 号

氏 名

ソニー株式会社